第47卷　第11期
2024年11月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 47 No. 11
Nov. 2024

关中地区高温脆弱性评估及其时空变化研究

包　微[1]，　黄晓军[1,2,3]，　纪王迪[1]

（1. 西北大学城市与环境学院，陕西　西安　710127；2. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室，陕西　西安　710127；3. 陕西西安城市生态系统定位观测研究站，陕西　西安　710127）

摘　要： 随着全球气候变暖，极端高温事件频发，对人类健康和社会经济发展构成严重威胁。综合利用遥感数据和社会经济统计数据，建立“暴露度-敏感性-适应能力”高温脆弱性评价指标体系，量化高温脆弱性指数，揭示2005—2020年关中地区高温脆弱性时空演化特征。结果表明：（1）2005—2020年关中地区夏季地表温度高温区面积增加，地表温度空间格局大致相似，次高温区和高温区呈片状分布在中部区域，次低温区和低温区集中分布在南部秦岭山区。（2）关中地区高温脆弱性空间集聚特征明显，分布格局与地表温度类似，较高和高等级脆弱性区域主要集中分布在中部平原，低和较低等级区域主要分布在南部秦岭山区。（3）2005—2020年关中地区高温脆弱性指数呈降低趋势，较高和高等级脆弱性面积占比由2005年的48.20%降低至2020年的37.49%。（4）2005—2010年，高温脆弱性等级发生变化的范围较小，2010—2020年，各高温脆弱性等级发生变化的范围明显增加，大部分区域脆弱性等级降低，主要表现为中脆弱性降为较低脆弱性、较高脆弱性降为中脆弱性、高脆弱性降为较高脆弱性。研究结果可为高温适应能力的提高和高温脆弱性的减缓提供参考与借鉴。

关 键 词： 地表温度；高温脆弱性；时空变化；关中地区

文章编号： 1000－6060（2024）11－1863－13（1863～1875）

IPCC第六次评估报告指出，2011—2020年全球地表温度比1850—1900年高出1.09 ℃[1]。高温热浪作为典型的极端天气事件之一，发生概率高、影响范围广、风险危害大，对人类健康已构成严重威胁。1995年芝加哥爆发的高温热浪事件造成约800人死亡[2]；2003年欧洲夏季热浪夺走了超过70000人的生命[3]；2021年美国华盛顿州爆发的高温热浪事件在三周内造成159人死亡[4]。除直接影响人类健康外，极端高温还会通过影响劳动生产效率进而造成经济损失，受全球升温影响，预计到2030年全球经济损失将达2.4×10^{12} USD[5]。近年来我国极端高温事件也愈发严峻，2013年夏季中国南方遭受强烈热浪袭击，中暑、心脑血管、消化道等疾病的发病率和死亡率激增[6]；2022年我国所爆发的高温事件综合强度为1961年有完整气象观测记录以来最大[7]。对此，在极端高温天气频发的背景下，如何科学合理评估城市高温热浪风险与脆弱性，并提出有针对性的治理对策，是当前国内外学者共同关注的重要议题。

脆弱性是指系统（如自然系统、社会-经济系统、生态系统等）容易受到外部干扰或风险影响（如自然灾害、气候变化等）进而对系统产生不利后果的可能性，通常受干扰或风险的暴露程度、系统的敏感性和适应能力影响[8]。脆弱性评价是脆弱性研究的重要内容，其有助于识别脆弱性单元的空间分布，为防灾减灾决策提供更有针对性的措施[9]。同时，脆弱性内涵还可以反映脆弱性主体对外部干扰的敏感性和适应能力，开展脆弱性评价研究也有利于识别脆弱性人群，揭示其面对风险的应对能力差

收稿日期： 2023-12-08；　**修订日期：** 2024-03-19
基金项目： 国家自然科学基金项目（41971178）资助
作者简介： 包微（2000-），女，硕士研究生，主要从事高温脆弱性研究. E-mail: baowei@stumail.nwu.edu.cn
通讯作者： 黄晓军（1983-），男，博士，教授，主要从事城市脆弱性与韧性研究. E-mail: huangxj@nwu.edu.cn

异。因此,将脆弱性分析工具应用到高温热浪脆弱性评价中,已成为当前气候变化脆弱性研究的热点,同时也对辨识高温脆弱性单元,制定减缓高温灾害对策,提升灾害韧性具有重要意义和实践价值。

国外学者对于高温热浪的研究起步较早,由早期的使用发病率、死亡率等健康指标数据进行病理研究来分析高温所导致的健康结果[10],逐渐向将高温对人体健康的影响纳入到高温热浪脆弱性评估所转变,使用脆弱性工具从自然特征、人口分布、社会经济等角度构建评价指标体系[11],通过层次分析法[12]、主成分分析法[13]、图层叠置法[14]等方法进行高温脆弱性评估,绘制高温脆弱性分布图,辨识脆弱单元。典型的成果,如Reid等[15]利用主成分分析法识别美国人口普查区影响高温灾害脆弱性的主成分变量,进行高温脆弱性综合制图;Mushore等[16]基于遥感数据和社会经济数据使用图层叠置法评估津巴布韦哈拉雷高温脆弱性;Tran等[17]使用层次分析法来确定脆弱性评估框架各维度指标的权重,对越南各省高温脆弱性进行评估。国内学者早期对高温热浪的研究主要集中于利用气象站点数据计算高温日数、强度、持续时间等高温热浪相关指数指标来探讨高温热浪的时空分布特征及成因[18-20],近年来随着遥感技术的快速发展,对高温热浪的研究不断深入,越来越多研究使用气象数据和遥感数据并结合自然环境、社会经济数据定量评估高温风险和高温脆弱性,多数研究在全国、省域、市域等宏观层面,如谢盼等[21]基于主成分分析法计算得到的社会脆弱性进行了中国高温灾害人群健康风险评价;郑雪梅等[22]基于"暴露-敏感-适应能力"高温脆弱性评估框架选取指标体系,使用层次分析法评估福建省沿海与内陆城市的高温热浪脆弱性;陈恺等[23]以北京中心城区为例运用熵权法确定各指标权重来探究高温热浪脆弱性分布情况,并提出规划建议。通过对比国内外研究成果,国外在高温社会脆弱性评估方面具有起步早、多维度、成果丰富、多学科交叉等方面的特点。国内有关高温热浪脆弱性评价的研究起步晚,相关成果较少,在脆弱性指标体系构建、评价方法选取等方面还需进一步完善,具体不足表现在多数研究使用气象站点数据来反映高温分布,而气象站点分布有限,难以精细地表现高温布局特征;从研究时间尺度来看,目前研究多以单一年份截面数据的静态评价为主,刻画其空间分布格局,较少涉及高温脆弱性的动态时空演化特征。

基于此,本文结合遥感数据和社会经济统计资料,从暴露度、敏感性、适应能力维度构建高温脆弱性评价指标体系,对2005—2020年关中地区高温脆弱性进行评价,揭示高温脆弱性时空演化特征和区域差异性并分析其原因。本研究可为高温脆弱性评估提供借鉴,并对高温适应能力的提高和高温脆弱性的减缓提供决策参考,从而因地制宜地制定科学的应对方案。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

关中地区位于陕西省中部,北邻黄土高原,南接秦岭山脉,渭河从中穿过,是关中平原国家级城市群的核心区域。关中地区包括西安、宝鸡、咸阳、铜川、渭南5个地级市及杨凌农业高新技术产业示范区(图1),总面积约为5.54×10^4 km^2。截至2021年末,关中地区常住人口为2595×10^4人,地区生产总值为18502.71×10^8元,分别占全省常住人口和地区生产总值的65.6%和62.1%。关中地区属暖温带半湿润半干旱气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥。近年来,受全球气候变暖、副热带高压控制、大气环流异常等因素的影响,关中地区高温热浪事件频繁发生,以西安市为例,2022年日最高气温在35 ℃以上的日数为44 d。此外,随着关中地区社会经济的快速发展和城市化进程的不断加快,城市热岛效应明显,大量人为热源加剧了地面增温效果;关中地区南北高、中间低的特殊地形使得中部平原地区的热量短时间内难以向周围扩散,进一步加剧了热环境。

1.2 高温脆弱性评价指标体系

结合已有文献和研究成果[22-24],本文从暴露度、

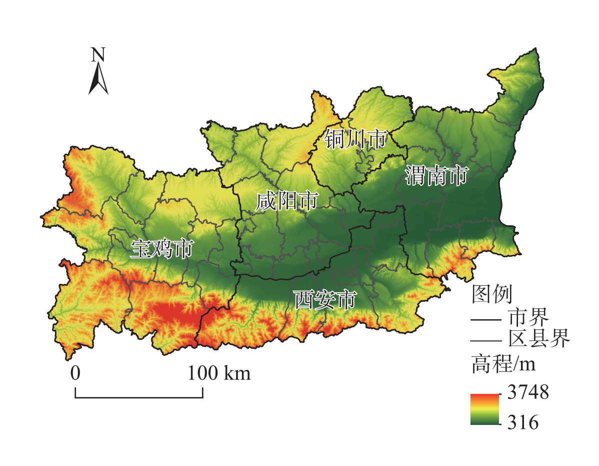


图1 研究区域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

敏感性、适应能力3个维度选取相关指标，构建高温脆弱性评价指标体系（表1），对关中地区高温脆弱性进行评价。

暴露度一般指外部环境因素对系统所造成的危险程度[25]。气象站点有较高的时间分辨率，但通常距离较远，数量分布有限，难以准确获取区域整体的热环境分布特征，而遥感监测覆盖范围广、空间分辨率高、空间连续性强，能够更全面、精细地呈现热环境的空间分布状况。在对北京[23]、西安[24]、成都[26]等城市高温脆弱性的研究中，地表温度被作为高温暴露度指标。且已有研究表明地表温度与空气温度之间呈高度正相关性[27-28]。因此，本文选用地表温度来表征区域高温暴露特征。

敏感性指居民受高温灾害影响的反应程度[25]，通常从人的生理状况和所处社会经济状况2个方面来选取指标[11]。有研究表明，老年人和儿童更容易受到极端高温天气的影响，因而出现热射病、热衰竭、热晕厥和热痉挛等热相关症状的住院比例也更高[29]。人口密度反映了人群聚集程度，密度大的地区通常更易受到高温的影响。本文采用人口密度、5岁以下人口密度、65岁及以上人口密度作为高温敏感性评价指标。适应能力反映了城市在面临高温热浪天气时通过调节自身内部结构来应对、调整、适应变化的能力[30]，可从经济发展水平、医疗服务水平[31]、降温设施等方面来考虑。其中，经济发展水平反映了地区应对高温灾害的经济能力，采用人均GDP进行衡量；每万人病床数和每万人卫生技术人员数是一个城市医疗服务水平的体现，可以用来反映应对高温灾害所能提供的健康保障能力；已有研究表明植被在一定区域尺度内具有降温效应[32]，选取归一化植被指数（NDVI）反映地区降温绿化设施水平。

1.3 数据来源与处理

本文所使用地表温度数据来源于NASA官网（ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search）和地理空间数据云提供的2005、2010、2015年和2020年6—8月MODIS 8 d地表温度产品（MOD11A2），空间分辨率为1 km。该数据由劈窗算法[33]反演得到，其精度达到1 K[34]。根据研究区所在条带号下载h26v05和h27v05两景影像，通过Modis Reprojection Tool（MRT）软件进行批量几何校正、拼接、重投影，然后在ArcGIS中裁剪研究区域，并使用栅格计算器转换温度单位为摄氏度（℃），最后采用均值法合成月和季尺度温度数据。温度转换公式如下：

$$T = DN \times 0.02 - 273.15 \tag{1}$$

式中：T为地表温度（℃）；DN为像元灰度值；0.02为产品比例因子。

NDVI来源于MOD13Q1数据，利用ArcGIS软件对MOD13Q1数据进行最大合成得到NDVI年最大值。人口密度和年龄结构数据来源于WorldPop（https://hub.worldpop.org/）。用于评价高温脆弱性的经济和医疗数据为区县尺度，来源于《陕西区域统计年鉴》《陕西统计年鉴》、各市统计年鉴和《国民经济和社会发展统计公报》。由于区县级的经济和医疗数据缺乏有效的空间化方法，假设各区县内的值相同，将其与行政边界进行空间链接，对矢量数据栅格化。最后，使用矢量边界对所用数据进行裁剪，重新定义投影为WGS_1984_UTM_Zone_49N，重采样为1 km，以便进行计算。

1.4 研究方法

1.4.1 *评价方法* 为了消除不同指标数据之间量级差异对评价结果产生的影响，在计算各指数前要对各原始数据做标准化处理，本文采用的是被广泛运用的极值标准化方法，极值标准化方法分为正向指标和负向指标标准化。计算公式如下：

$$正向指标标准化：Y_{ij} = \frac{X_{ij} - \min X_{ij}}{\max X_{ij} - \min X_{ij}} \tag{2}$$

表1　高温脆弱性评价指标体系

Tab. 1　Evaluation index system of heat vulnerability

目标层	维度层	指标层	指标释义	指标权重	指标属性
高温脆弱性	暴露度	地表温度/℃	夏季地表温度均值	1.0000	正
	敏感性	人口密度/人·km^{-2}	反映研究区域人口聚集程度	0.3418	正
		5岁以下人口密度/人·km^{-2}	反映儿童的敏感性特征	0.3153	正
		65岁及以上人口密度/人·km^{-2}	反映老年人的敏感性特征	0.3429	正
	适应能力	人均GDP/元	反映研究区域经济水平	0.3182	负
		每万人病床数/张·(10^{4}人)$^{-1}$	反映应对高温灾害健康保障水平	0.2730	负
		每万人卫生技术人员数/人·(10^{4}人)$^{-1}$	反映应对高温灾害健康保障水平	0.3314	负
		归一化植被指数(NDVI)	反映研究区域应对高温的绿化设施水平	0.0774	负

负向指标标准化：$Y_{ij}=\dfrac{\max X_{ij}-X_{ij}}{\max X_{ij}-\min X_{ij}}$ （3）

式中：X_{ij}、$\max X_{ij}$、$\min X_{ij}$和Y_{ij}分别为第i格网第j指标的原始值、最大值、最小值和标准化后的值。在确定指标权重方法中，分为主观赋权法和客观赋权法。本文采用熵权法计算各评价指标权重，该方法只对原始数据进行计算，避免了主观评价的影响[35]，且计算过程较为简便。

高温脆弱性是暴露度、敏感性和适应能力相互作用的函数，3个维度综合影响了高温脆弱性。基于已有研究[9]，本文采用函数模型法和综合指数法来构建脆弱性指标评价模型[36]。高温脆弱性指数计算公式如下：

$$\mathrm{VI}=\mathrm{EI}+\mathrm{SI}-\mathrm{AI} \quad (4)$$

式中：VI为高温脆弱性指数；EI为高温暴露度指数；SI为敏感性指数；AI为适应能力指数。其中，高温暴露度和敏感性对脆弱性具有正向作用，即高温暴露度和敏感性越高，脆弱性指数越大；适应能力对敏感性具有抵消作用。高温暴露度指数、敏感性指数和适应能力指数通过加权求和计算，计算公式如下：

$$\mathrm{EI}=\sum_{i,j=1}^{n}W_j e_{ij} \quad \mathrm{SI}=\sum_{i,j=1}^{n}W'_j s_{ij} \quad \mathrm{AI}=\sum_{i,j=1}^{n}W''_j a_{ij} \quad (5)$$

式中：W_j、W'_j、W''_j分别为暴露度、敏感性、适应能力第j指标的权重；e_{ij}为第i格网暴露度第j指标标准化值；s_{ij}为第i格网敏感性第j指标标准化值；a_{ij}为第i格网适应能力第j指标标准化值。

1.4.2 空间自相关分析 空间自相关是一种用来测度属性值的空间分布与邻近区域空间关联性的统计分析方法。空间自相关可分为全局空间自相关和局部空间自相关2种。

全局空间自相关可用来识别变量在区域整体上的空间集聚程度，通常使用全局Moran's I指数来表示。本文使用全局Moran's I指数来判断研究区域空间单元地表温度值和高温脆弱性指数值的平均相似程度，计算公式如下：

$$I_{全局}=\frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\omega_{ij}\left(x_i-\bar{x}\right)\left(x_j-\bar{x}\right)}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\omega_{ij}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)^2} \quad (6)$$

式中：$I_{全局}$为全局空间自相关指数；n为研究区空间单元总数；x_i和x_j分别为空间单元i和j的地表温度值或高温脆弱性指数值；$\bar{x}$为地表温度或高温脆弱性指数的平均值；ω_{ij}为空间权重矩阵。全局Moran's I指数介于-1~1之间，当$I_{全局}>0$时，表示研究区域空间单元具有正相关性，取值越接近1，属性值的空间正相关性越强，越存在高度集聚现象；当$I_{全局}<0$时，表示研究区域空间单元具有负相关性，取值越接近-1，属性值的空间负相关性越强，越存在高度分散现象；当$I_{全局}=0$时，表示研究区域空间单元之间不存在集聚或分散，呈随机分布，不具有相关性。

局部空间自相关用来检验局部地区空间单元与周围单元属性值之间的相关性，本文采用局部Moran's I指数揭示地表温度值和高温脆弱性指数值在局部地区的相关程度，计算公式如下：

$$I_{局部}=\frac{n\left(x_i-\bar{x}\right)\sum_{j=1}^{n}\omega_{ij}\left(x_i-\bar{x}\right)}{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)^2} \quad (7)$$

式中：$I_{局部}$为局部空间自相关指数；n为研究区空间单元总数；x_i和x_j分别为空间单元i和j的地表温度值或高温脆弱性指数值；$\bar{x}$为地表温度或高温脆弱性指数的平均值；ω_{ij}为空间权重矩阵。当$I_{局部}>0$并通过检验时，表示空间单元与邻近单元之间属性值相似，存在“高-高”和“低-低”2种局部空间自相关类型，其中，“高-高”表示高值被高值所包围，“低-低”表示低值被低值所包围；当$I_{局部}<0$时，表示空间单元与邻近单元之间属性值相异，存在“高-低”和“低-高”2种局部空间自相关类型，其中，“高-低”表示高值被低值所包围，“低-高”表示低值被高值所包围。

2 结果与分析

2.1 高温暴露度

采用均值-标准差法对地表温度进行等级划分，该方法基于研究区平均地表温度(μ)与不同倍数标准差(SD)之间的加减组合，可将地表温度分为低温区、次低温区、中温区、次高温区、高温区5个等级，分级标准如表2所示。

2005—2020年关中地区夏季各等级地表温度面积占比变化如图2所示。低温区2005年面积最

表2 地表温度等级划分标准

Tab. 2 Classification standard of land surface temperature

地表温度等级	地表温度范围
低温区	LST<μ-SD
次低温区	μ-SD≤LST≤μ-0.5SD
中温区	μ-0.5SD<LST≤μ+0.5SD
次高温区	μ+0.5SD<LST≤μ+SD
高温区	LST>μ+SD

注：LST为温度区间；μ为平均地表温度；SD为标准差。

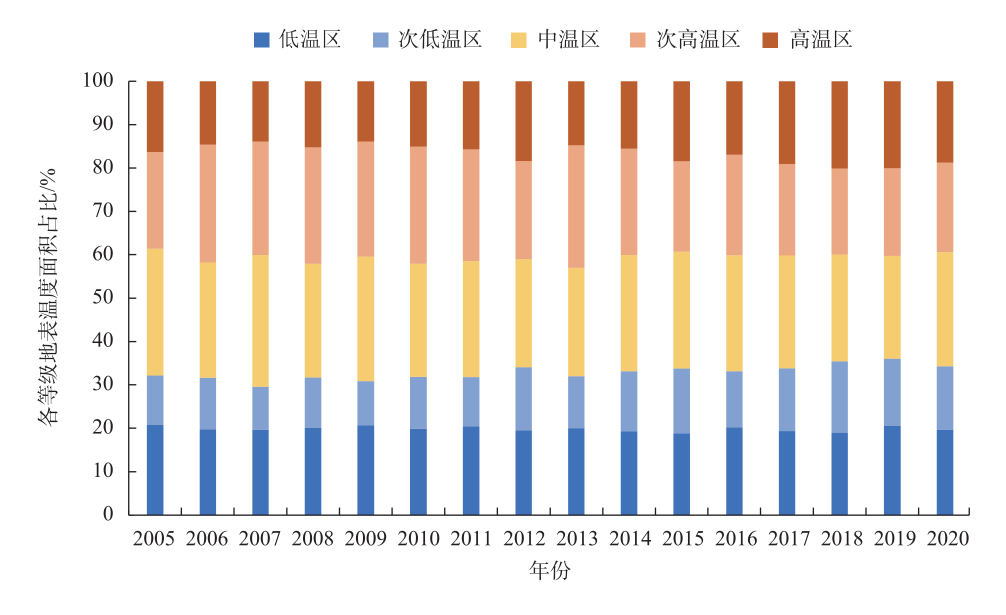


图2　2005—2020年关中地区夏季各等级地表温度面积占比

Fig. 2　Proportion of land surface temperature area of different grades in the Guanzhong region in summer from 2005 to 2020

大，占比20.79%；次低温区2018年面积最大，占比16.45%；中温区2007年面积最大，占比30.40%；次高温区2013年面积最大，占比28.26%；高温区2018年面积最大，占比20.10%。2005—2020年，次低温区和高温区面积有所增加，而中温区和次高温区面积有所减少，低温区面积相对比较稳定。其中，高温区面积变化最显著，由2005年的16.36%升至2020年的18.75%，面积占比增加了2.39%。

根据上述地表温度等级划分标准，对关中地区夏季白天平均地表温度进行等级分类，得到2005、2010、2015年和2020年地表温度空间格局（图3）。可以发现：2005、2010、2015年和2020年关中地区地

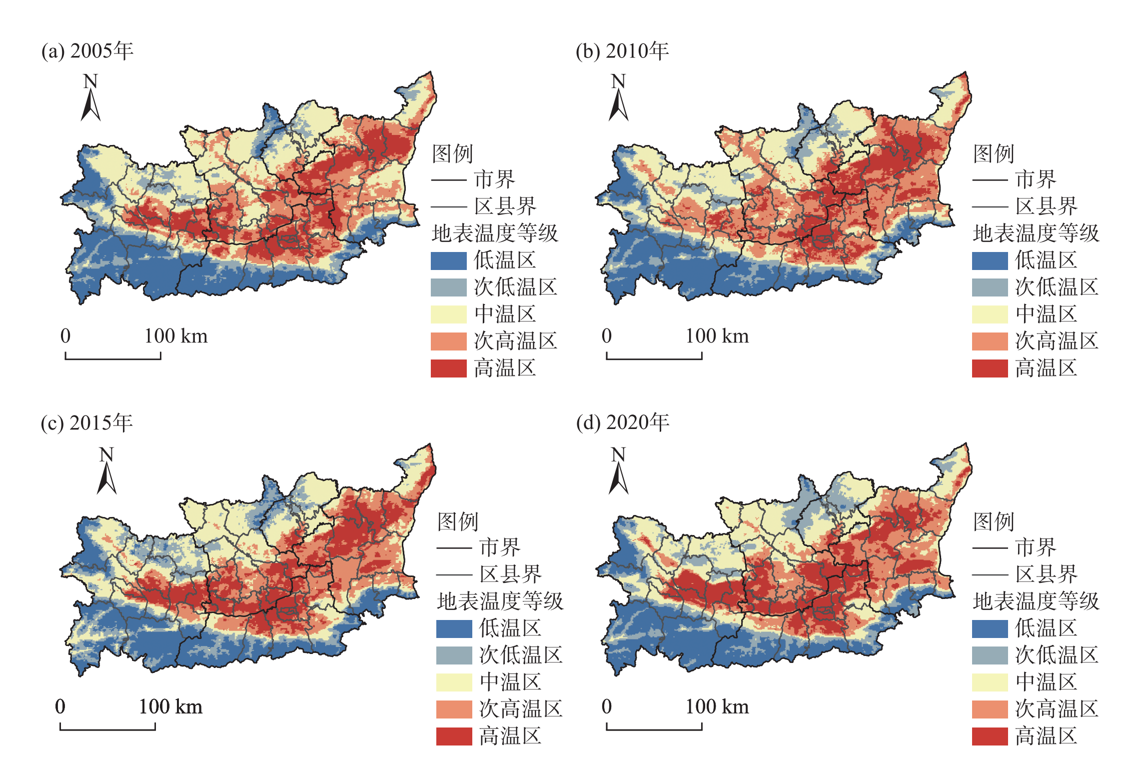


图3　2005—2020年关中地区地表温度空间格局

Fig. 3　Spatial patterns of land surface temperature in the Guanzhong region from 2005 to 2020

表温度空间格局大致相似，次高温区和高温区主要分布在西安市中部和北部、宝鸡市中部、咸阳市南部、渭南市大部分地区及铜川市南部小部分地区，呈连续片状分布，这些区域地形多为平原与盆地，人口密集，城市化和工业化程度较高，受人类活动影响较为强烈；低温区和次低温区集中分布在南部的秦岭山脉，山区海拔相对较高且植被覆盖度高，有着更强的蒸散发作用；与2005、2010年和2015年相比，2020年的高温区范围明显扩大，分布更为集中，向关中地区中部区域聚集，在空间上仍集中在西安市北部、宝鸡市中部、咸阳市南部和渭南市中部。

此外，在ArcGIS中使用自然断点法将高温暴露度划分为高、较高、中、较低、低5个等级（图4），2005、2010、2015年和2020年关中地区高温暴露度格局大致相似，较高和高等级高温暴露度分布情况对应地表温度次高温区和高温区，较低和低等级高温暴露度分布情况对应次低温区和低温区。

对2005、2010、2015年和2020年关中地区夏季白天平均地表温度进行全局空间自相关检验，计算得出的结果显示，各年份的全局Moran's *I*指数均为正值，且均通过显著性检验（$P<0.01$），表明各个年份的夏季白天平均地表温度存在显著空间正相关，有明显的空间集聚特征。进一步进行局部空间自相关分析，检验地表温度在局部空间上的相关程度，得出2005、2010、2015年和2020年地表温度的空间关联类型（图5）。由图5可知，各年份空间自相关类型只有"高-高"和"低-低"2种类型，不存在"高-低"和"低-高"类型；"高-高"类型（地表温度高值集聚区）范围先扩大后缩小，分布在关中地区中部大部分区域，呈连续大片分布；"低-低"类型（地表温度低值集聚区）范围变化同"高-高"类型一致，先扩大后缩小，主要分布在关中地区南部秦岭山脉。

2.2 高温敏感性

为了更易于比较不同时期的高温敏感性指数，在ArcGIS中使用自然断点法分别对2005、2010、2015年和2020年高温敏感性指数进行统一标准划分，将敏感性指数统一划分为低、较低、中、较高、高5个等级（图6）。由图6可知，各年份高温敏感性格局大致相似，较高和高敏感性区域主要集中分布在西安市主城区，此外，较高敏感性区域在杨凌农业高新技术产业示范区、宝鸡市市辖区也有零散分布；中敏感性区域零散分布在西安市、宝鸡市、咸阳市、铜川市和渭南市市辖区；较低敏感性区域分布在各大城市中心城区边缘和周边县域中心城区；受人口分布的集中性影响，低敏感性区域范围较广。

2.3 高温适应能力

从2005、2010、2015年和2020年高温适应能力分布格局（图7）可以看出，较高和高等级适应能力

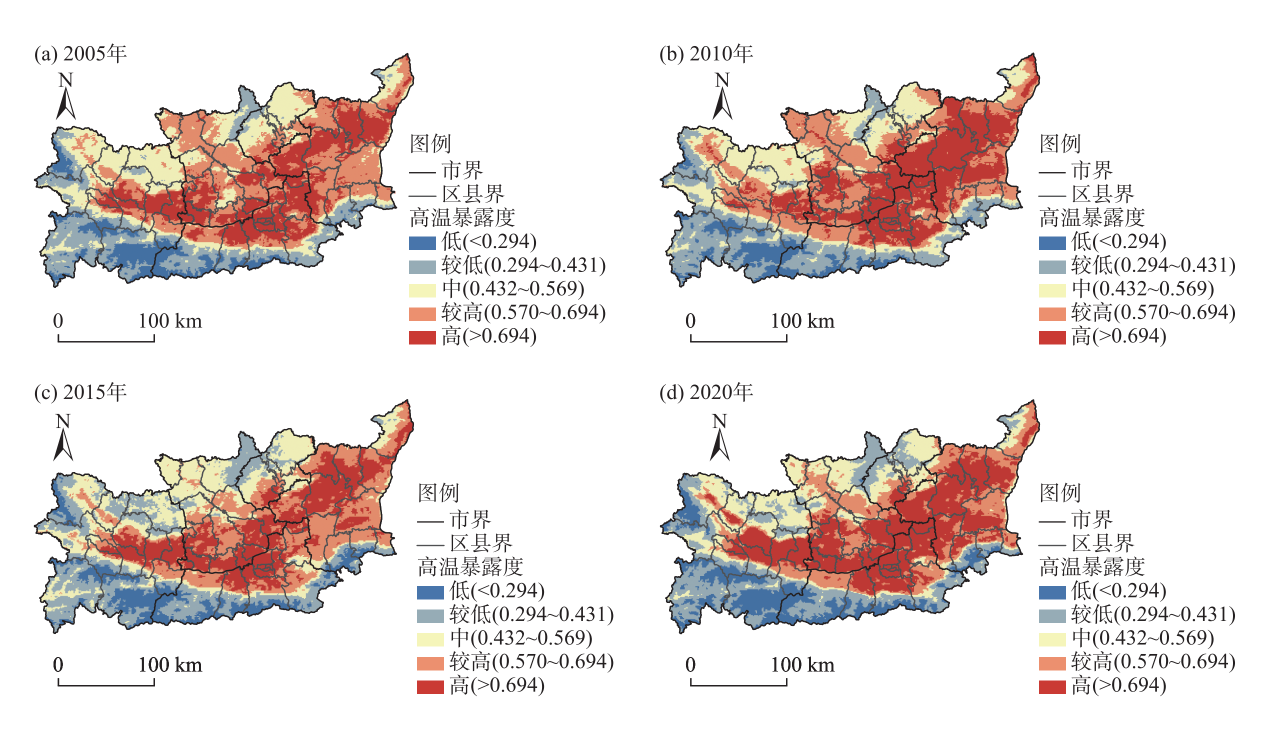


图4 2005—2020年关中地区高温暴露度空间格局

Fig. 4 Spatial patterns of heat exposure in the Guanzhong region from 2005 to 2020

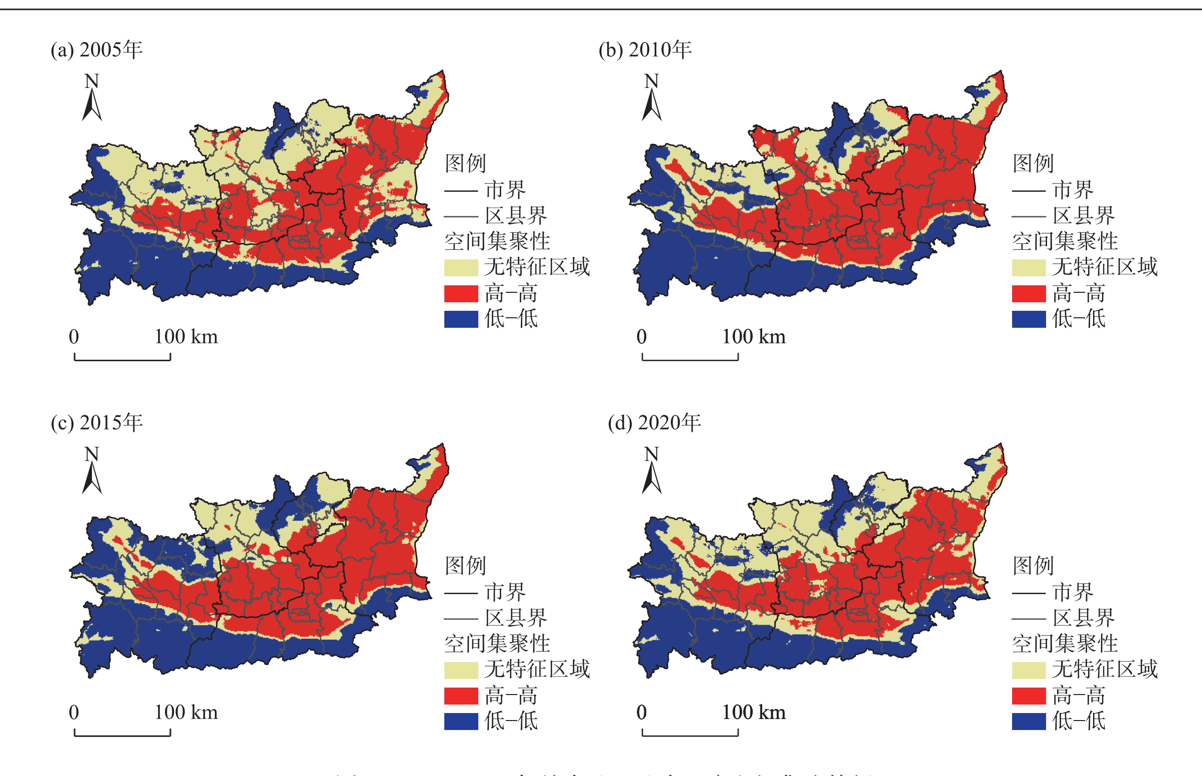


图5　2005—2020年关中地区地表温度空间集聚特征

Fig. 5　Spatial clusters of land surface temperature in the Guanzhong region from 2005 to 2020

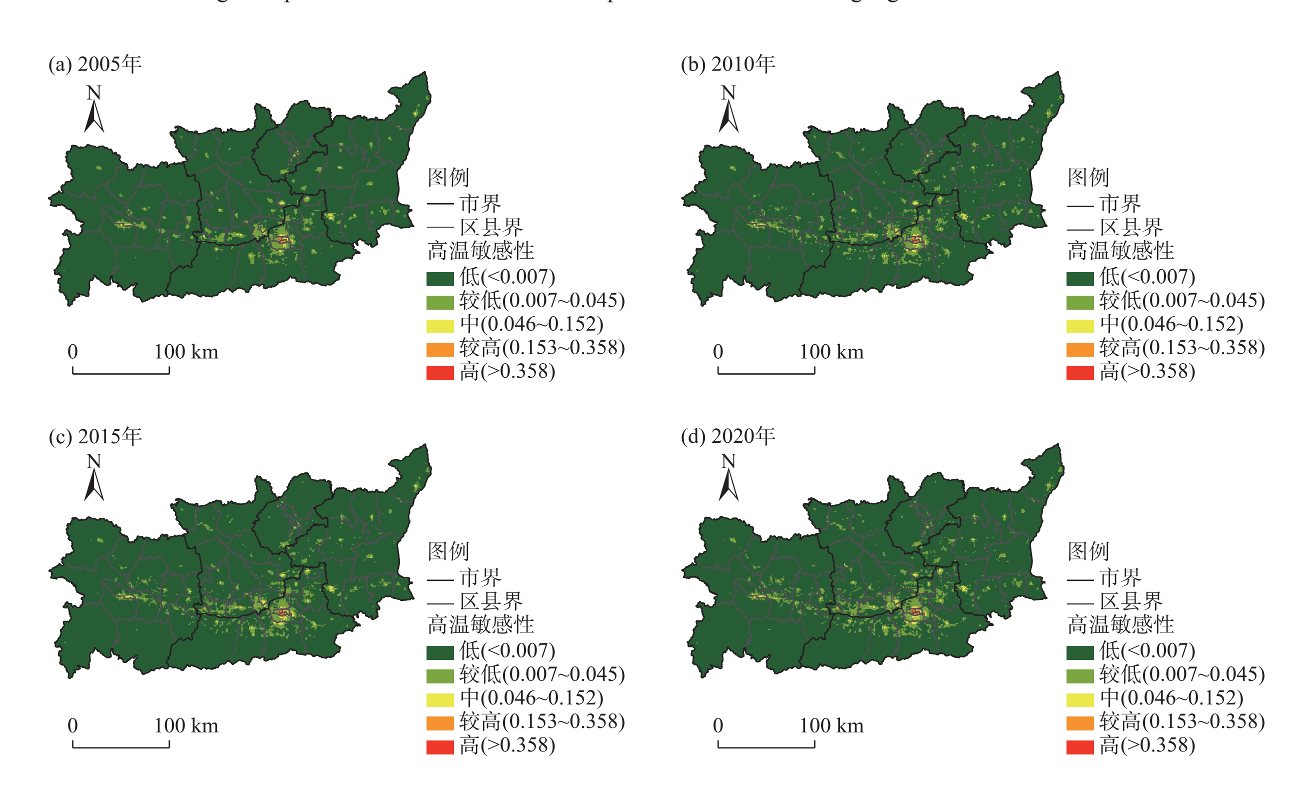


图6　2005—2020年关中地区高温敏感性空间格局

Fig. 6　Spatial patterns of heat sensitivity in the Guanzhong region from 2005 to 2020

范围较小，较为分散地分布在西安市、咸阳市、宝鸡市和铜川市这4个城市市辖区内，其中2005年还分布在西安市北部；2010年和2015年宝鸡市西南部也有分布；2020年较高等级适应能力还分布在宝鸡市东北部麟游县。中适应能力区域分布也较为分散，2005年仅在宝鸡市、西安市、铜川市和渭南市小部

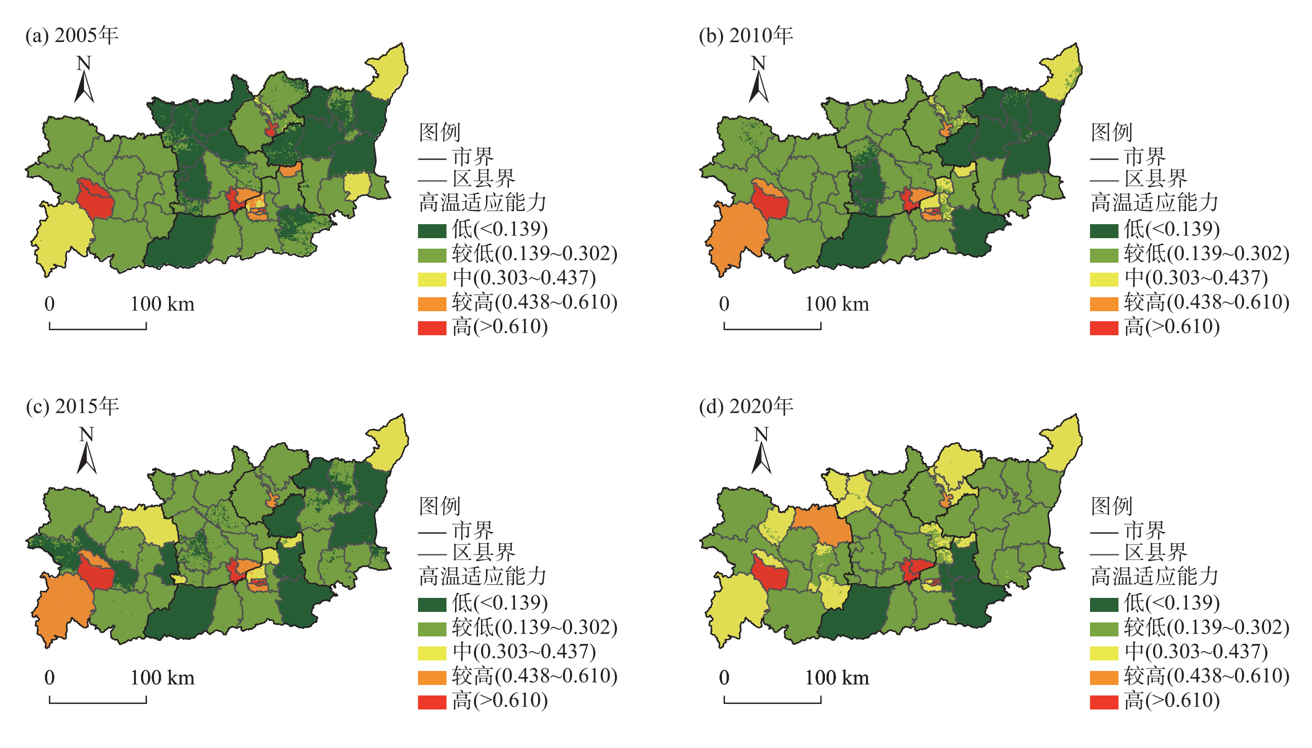


图7 2005—2020年关中地区高温适应能力空间格局

Fig. 7 Spatial patterns of heat adaptive capacity in the Guanzhong region from 2005 to 2020

分地区分布，2020年范围有所扩大，在各市均有分布。较低和低等级适应能力区域范围较广，2005年低等级适应能力区域分布在西安市西南部、咸阳市和渭南市大部分地区；2010年咸阳市北部低等级转换为较低等级；2015年低等级范围转移至宝鸡市中部；与2015年相比，2020年低等级范围明显缩小。从时间维度上来看，关中地区高温适应能力指数由2005年的0.206增加至2020年的0.267，主要是由于经济水平不断提高，人均GDP快速增加，加上每万人病床数和卫生技术人员数的增加表明医疗卫生条件不断完善，从一定程度上提高了应对高温灾害的健康保障水平。

2.4 高温脆弱性

采用式(3)计算关中地区2005、2010、2015年和2020年高温脆弱性指数，使用自然断点法将脆弱性指数统一划分为低、较低、中、较高、高5个等级(图8)。结果显示：关中地区各年份高温脆弱性分布格局整体呈南北低、中间高，与地表温度格局大致相似。较高和高等级脆弱性主要集中分布在中部的平原地区，呈连续大片状分布；与2005年相比，2020年较高和高等级范围减少，咸阳市北部较高等级区域转换为中脆弱性等级，渭南市高等级区域转换为较高等级。低和较低等级区域范围较小，主要分布在南部秦岭山区；与2005年和2010年相比，2015年和2020年低和较低等级范围扩大至宝鸡市北部和铜川市。

使用ArcGIS软件对关中地区2005、2010、2015年和2020年高温脆弱性进行全局空间自相关检验，计算得出的结果显示，各时间段的全局Moran's *I*指数均为正值，且均通过显著性检验(P<0.01)，表明4个年份高温脆弱性存在显著空间正相关，空间集聚特征明显。进一步进行局部空间自相关分析，检验高温脆弱性在局部空间上的相关程度，得出2005、2010、2015年和2020年高温脆弱性的空间关联类型(图9)。由图9可知，各年份的空间自相关类型有“高-高”“低-低”“高-低”“低-高”4种类型，表明关中地区高温脆弱性表现出较强的局部空间自相关特征；4个年份的局部空间自相关格局大致相似，“高-高”类型(高温脆弱性高值集聚区)主要分布在关中地区中部大部分区域，由分散变得集聚，与地表温度高值区在空间上有高度一致性，表明高温脆弱性空间格局很大程度上受到地表温度的影响，这与地形、海拔、人类活动有着紧密的联系。“低-低”类型(高温脆弱性低值集聚区)主要分布在关中地区南部山区，而在2015年和2020年在宝鸡市北部和铜川市北部也有分布。

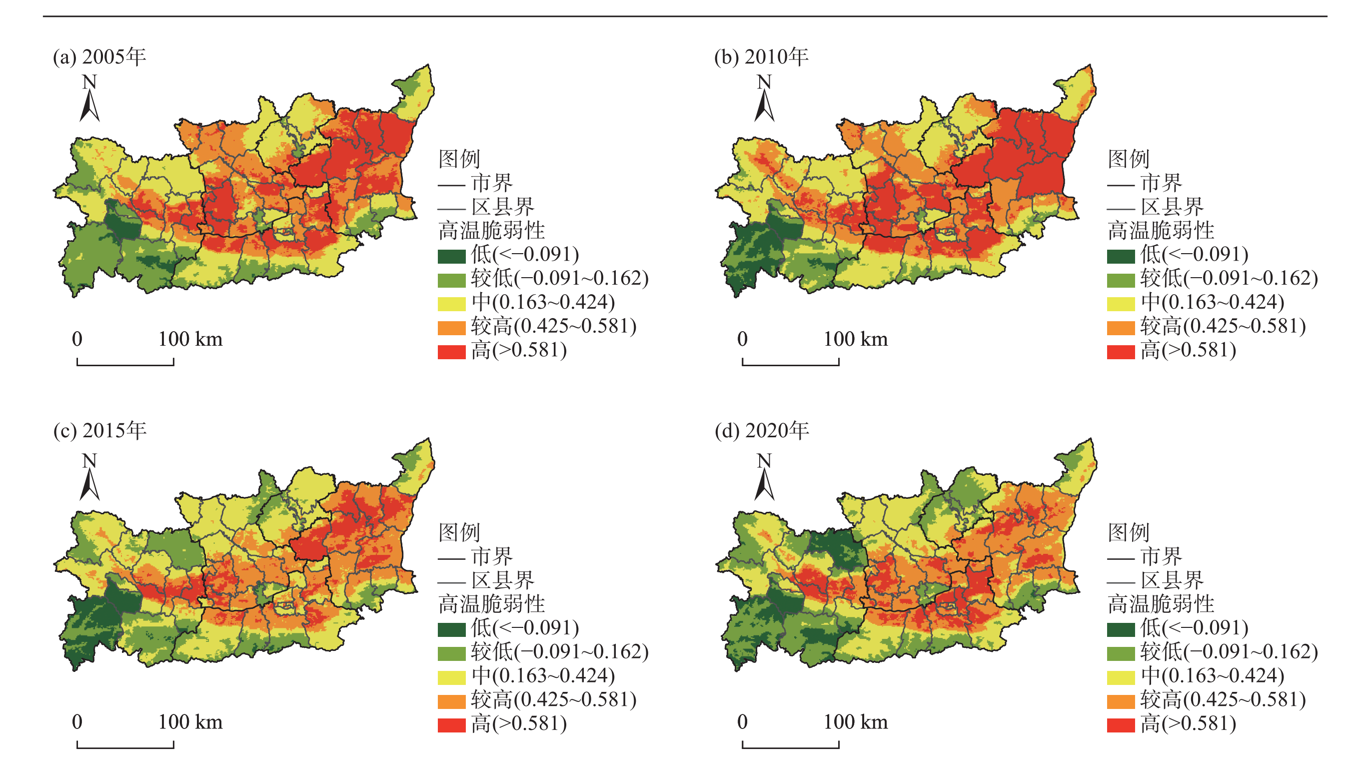


图8　2005—2020年关中地区高温脆弱性空间格局

Fig. 8　Spatial patterns of heat vulnerability in the Guanzhong region from 2005 to 2020

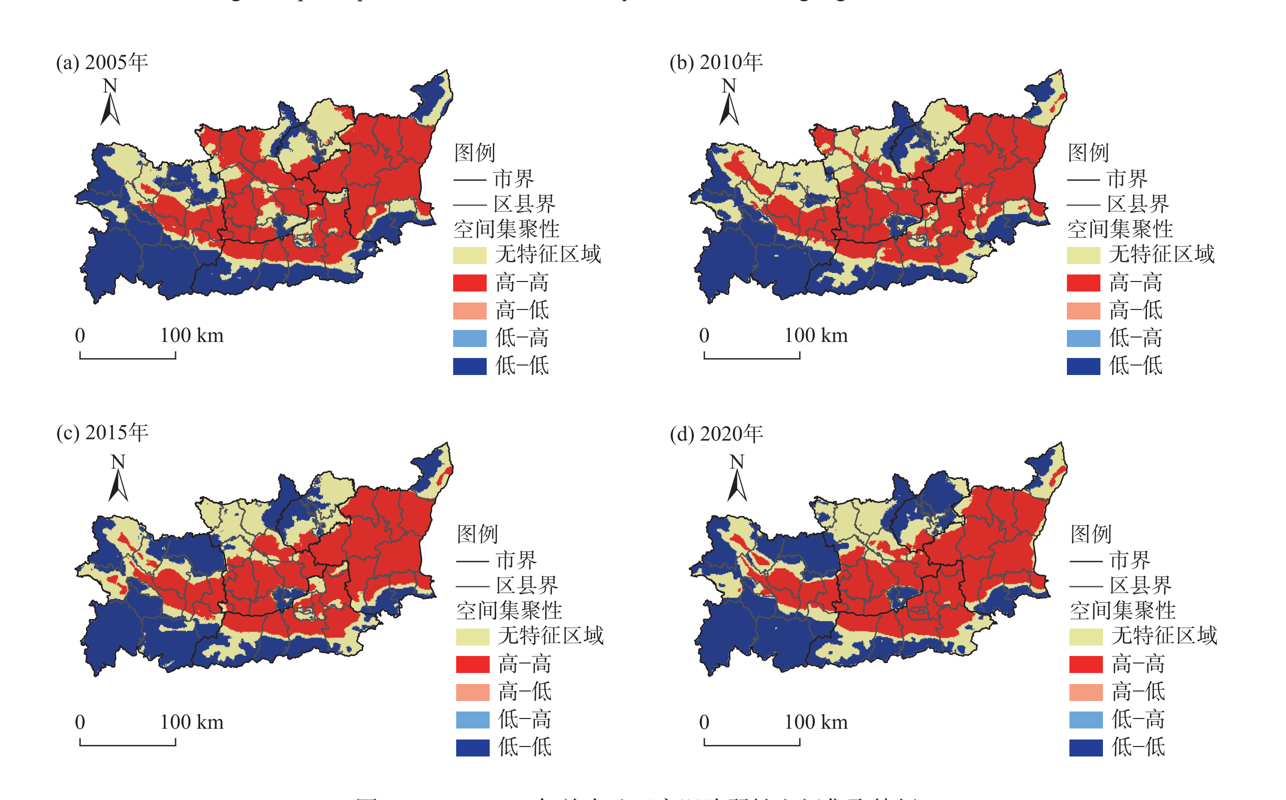


图9　2005—2020年关中地区高温脆弱性空间集聚特征

Fig. 9　Spatial clusters of heat vulnerability in the Guanzhong region from 2005 to 2020

2005—2020年关中地区高温脆弱性指数呈现降低趋势，由2005年的0.374降低至2020年的0.285。借助ArcGIS及Origin进行数据分析，得到2005—2020年各等级高温脆弱性面积占比及其变化情况(图10)。2005、2010、2015年和2020年关中地区高温脆弱性等级的面积大小由高到低依次为：

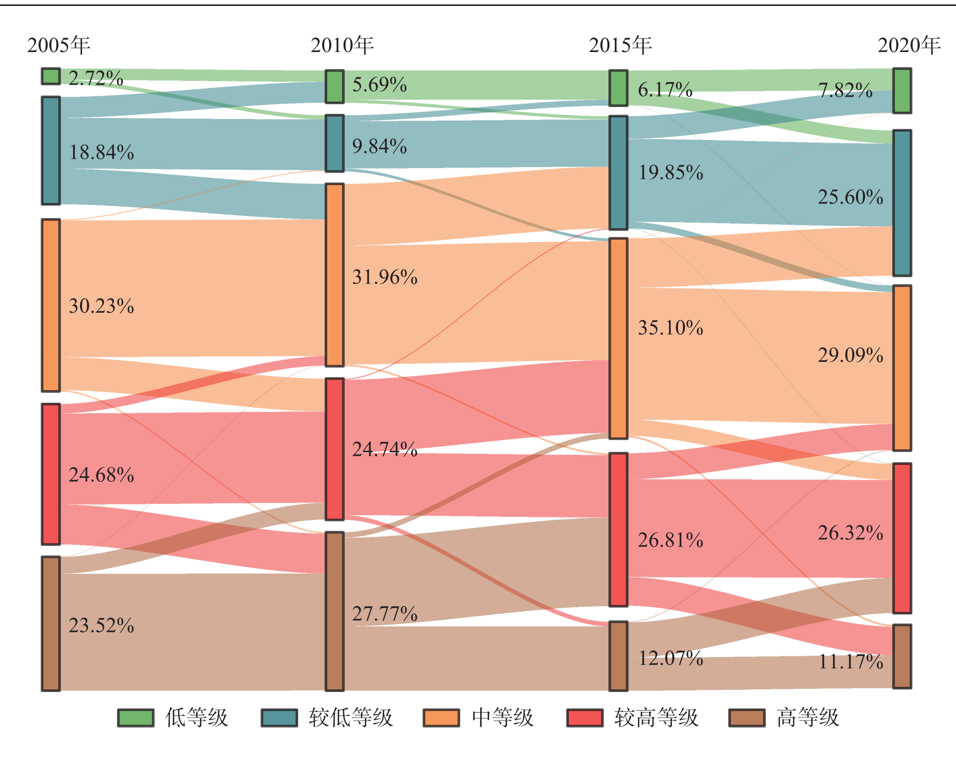


图10 2005—2020年关中地区各等级高温脆弱性转化特征

Fig. 10 Characteristics of heat vulnerability transformation of different grades in the Guanzhong region from 2005 to 2020

中脆弱性(30.23%)>较高脆弱性(24.68%)>高脆弱性(23.52%)>较低脆弱性(18.84%)>低脆弱性(2.72%);中脆弱性(31.96%)>高脆弱性(27.77%)>较高脆弱性(24.74%)>较低脆弱性(9.84%)>低脆弱性(5.69%);中脆弱性(35.10%)>较高脆弱性(26.81%)>较低脆弱性(19.85%)>高脆弱性(12.07%)>低脆弱性(6.17%);中脆弱性(29.09%)>较高脆弱性(26.32%)>较低脆弱性(25.60%)>高脆弱性(11.17%)>低脆弱性(7.82%)。较高和高脆弱性区域范围由2005年的48.20%缩小至2020年的37.49%。

通过计算2005—2010、2010—2015年和2015—2020年这3个时期的高温脆弱性等级转移矩阵,分析关中地区高温脆弱性在研究时段内的相互转化关系。2005—2010年,高温脆弱性等级发生变化的范围较小(面积占比30.47%),主要是较低、中和较高脆弱性发生转移;2010—2020年,各高温脆弱性等级发生变化的范围明显增加,主要表现为脆弱性等级的降低:中等级转化为较低等级、较高等级转化为中等级、高等级转化为较高等级;2010—2015年中等级到较低等级、较高等级到中等级、高等级到较高等级3种转化情况面积分别占研究区总面积的10.81%、12.77%和15.54%,2015—2020年转化面积分别占研究区总面积的8.69%、4.58%和6.22%。

3 讨论

本文评估了关中地区高温脆弱性时空演变格局,进一步完善了高温脆弱性动态演化研究。目前,高温脆弱性研究选择的人口数据多为统计资料获取,以行政区为统计单元,本文使用WorldPop人口数据可以精细地显示人口的空间分布特征。2005—2020年关中地区地表高温区呈现扩张趋势,这与大西安区夏季白天平均地表温度呈增加趋势的研究结果相符[37]。从高温脆弱性时空格局来看,关中地区高温脆弱性空间分布格局整体呈南北低、中间高,与地表温度格局大致相似,对中国城市高温脆弱性的研究也表明其空间分布与城市高温暴露度格局相似[30],说明关中地区高温脆弱性的空间分布主要受自然因素影响,且脆弱性指数具有显著的空间集聚特征,与对上海市高温热浪风险研究[38]得出的空间集聚特征结果一致。2005—2020年高温脆弱性指数呈现降低趋势,主要是由于随着社会经济水平的提高和城市化进程的不断加快,适应能力指数逐年增加,适应能力指数上升量大于暴露度和敏感性。

因此,有必要采取相应措施,提高地区高温适

应能力来降低高温脆弱性，对策如下：(1) 对于较高和高暴露度区域，在建成环境方面，根据不同城市区域特点合理规划蓝绿空间，改善城市热环境，具体可采取垂直绿化、凉爽屋顶、浅色屋面等具体措施，同时优化建筑设计和施工，减少人为热排放，推广绿色建筑、低碳建筑[23]、避免大规模建筑密度等方式。(2) 对于较高和高敏感性区域，重点关注老年人、儿童、室外工作者、慢性病患者等高敏感性群体，完善健康预警系统，划分风险等级，通过电视广播、互联网等方式宣传避暑知识，提高对高温灾害的认知水平，并在极端高温灾害发生时，医疗机构做好紧急响应措施，提供健康保障。在社区层面可采取电话访问、登记信息、建立健康档案等方式追踪敏感群体在高温热浪频发时期的身体健康状况。(3) 对于低和较低适应能力区域，当地政府可注重公共设施和空间的改造，完善纳凉场所规划，以延长纳凉场所开放时间等方式综合提升高温适应能力，加大财政投入，逐步解决高温灾害下资源分配不均等问题。

4 结 论

(1) 2005—2020年关中地区夏季地表温度高温区面积呈增加趋势，空间分布格局大致相似，次高温区和高温区呈连续片状分布在中部区域，低温区和次低温区集中分布在南部秦岭山脉。2005—2020年高温敏感性格局大致相似，较高和高敏感性区域主要集中分布在西安市主城区，中敏感性区域零散分布在各市市辖区；高温适应能力没有明显的空间集聚特征。

(2) 2005—2020年关中地区高温脆弱性分布格局与地表温度类似，空间集聚特征明显，较高和高等级脆弱性主要集中分布在中部平原地区；低和较低等级区域范围较小，主要分布在南部秦岭山区。

(3) 关中地区夏季高温脆弱性指数由2005年的0.374降低至2020年的0.285，较高和高脆弱性区域面积占比由2005年的48.20%降低至2020年的37.49%。2005年关中地区高温脆弱性各等级的面积占比呈现中脆弱性(30.23%)>较高脆弱性(24.68%)>高脆弱性(23.52%)>较低脆弱性(18.84%)>低脆弱性(2.72%)，2020年各高温脆弱性等级面积占比呈现中脆弱性(29.09%)>较高脆弱性(26.32%)>较低脆弱性(25.60%)>高脆弱性(11.17%)>低脆弱性(7.82%)。

(4) 2005—2010年，高温脆弱性等级发生变化的范围较小，2010—2020年，各高温脆弱性等级发生变化的范围明显增加，主要体现在脆弱性等级降低：中等级转化为较低等级、较高等级转化为中等级、高等级转化为较高等级。

参考文献(References)

[1] IPCC. Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

[2] Whitman S, Good G, Donoghue E R, et al. Mortality in Chicago attributed to the July 1995 heat wave[J]. American Journal of Public Health, 1997, 87(9): 1515-1518.

[3] Stott P A, Stone D A, Allen M R. Human contribution to the European heatwave of 2003[J]. Nature, 2004, 432(7017): 610-614.

[4] Philip S Y, Kew S, van Oldenborgh G J, et al. Rapid attribution analysis of the extraordinary heat wave on the Pacific coast of the US and Canada in June 2021[J]. Earth System Dynamics, 2022, 13(4): 1689-1713.

[5] Borg M A, Xiang J, Anikeeva O, et al. Occupational heat stress and economic burden: A review of global evidence[J]. Environmental Research, 2021, 195: 110781, doi: 10.1016/j.envres.2021.110781.

[6] 黄大鹏, 张蕾, 高歌. 未来情景下中国高温的人口暴露度变化及影响因素研究[J]. 地理学报, 2016, 71(7): 1189-1200. [Huang Dapeng, Zhang Lei, Gao Ge. Changes in population exposure to high temperature under a future scenario in China and its influencing factors[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(7): 1189-1200.]

[7] 夏智宏, 刘敏, 秦鹏程, 等. 2022年长江流域高温干旱过程及其影响评估[J]. 人民长江, 2023, 54(2): 21-28. [Xia Zhihong, Liu Min, Qin Pengcheng, et al. Development process of high temperature and drought events over Yangtze River Basin in 2022 and assessment on its influences[J]. Yangtze River, 2023, 54(2): 21-28.]

[8] IPCC. Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group Ⅱ to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

[9] Frazier T G, Thompson C M, Dezzani R J. A framework for the development of the SERV model: A spatially explicit resilience-vulnerability model[J]. Applied Geography, 2014, 51: 158-172.

[10] Hajat S, Armstrong B, Baccini M, et al. Impact of high temperatures on mortality: Is there an added heat wave effect[J]. Epidemiology, 2006, 17(6): 632-638.

[11] 谢盼, 王仰麟, 彭建, 等. 基于居民健康的城市高温热浪灾害脆弱性评价——研究进展与框架[J]. 地理科学进展, 2015, 34(2): 165-174. [Xie Pan, Wang Yanglin, Peng Jian, et al. Health related urban heat wave vulnerability assessment: Research progress and framework[J]. Progress in Geography, 2015, 34(2): 165-174.]

[12] Rinner C, Taranu J P. Map-based exploratory evaluation of non-medical determinants of population health[J]. Transactions in GIS, 2006, 10(4): 633-649.

[13] Johnson D P, Stanforth A, Lulla V, et al. Developing an applied extreme heat vulnerability index utilizing socioeconomic and environmental data[J]. Applied Geography, 2012, 35(1): 23-31.

[14] Aubrecht C, Özceylan D. Identification of heat risk patterns in the US National Capital Region by integrating heat stress and related vulnerability[J]. Environment International, 2013, 56: 65-77.

[15] Reid C E, O' Neill M S, Gronlund C J, et al. Mapping community determinants of heat vulnerability[J]. Environmental Health Perspectives, 2009, 117(11): 1730-1736.

[16] Mushore D T, Mutanga O, Odindi J, et al. Determining extreme heat vulnerability of Harare Metropolitan City using multispectral remote sensing and socio-economic data[J]. Journal of Spatial Science, 2017, 63(1): 173-191.

[17] Tran D N, Doan V Q, Nguyen V T, et al. Spatial patterns of health vulnerability to heat waves in Vietnam[J]. International Journal of Biometeorology, 2020, 64(7): 863-872.

[18] 叶殿秀, 尹继福, 陈正洪, 等. 1961—2010年我国夏季高温热浪的时空变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2013, 9(1): 15-20. [Ye Dianxiu, Yin Jifu, Chen Zhenghong, et al. Spatiotemporal change characteristics of summer heatwaves in China in 1961—2010[J]. Climate Change Research, 2013, 9(1): 15-20.]

[19] 贾佳, 胡泽勇. 中国不同等级高温热浪的时空分布特征及趋势[J]. 地球科学进展, 2017, 32(5): 546-559. [Jia Jia, Hu Zeyong. Spatial and temporal features and trend of different level heat waves over China[J]. Advances in Earth Science, 2017, 32(5): 546-559.]

[20] 卜凡蕊, 孙鹏, 姚蕊, 等. 淮河流域高温热浪时空演变规律及成因分析[J]. 地理科学, 2021, 41(4): 705-716. [Bu Fanrui, Sun Peng, Yao Rui, et al. High temperature heat waves in the Huaihe River Basin and relation to the Madden-Julian oscillation: Spatiotemporal properties and causes[J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(4): 705-716.]

[21] 谢盼, 王仰麟, 刘焱序, 等. 基于社会脆弱性的中国高温灾害人群健康风险评价[J]. 地理学报, 2015, 70(7): 1041-1051. [Xie Pan, Wang Yanglin, Liu Yanxu, et al. Incorporating social vulnerability to assess population health risk due to heat stress in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(7): 1041-1051.]

[22] 郑雪梅, 王怡, 吴小影, 等. 近20年福建省沿海与内陆城市高温热浪脆弱性比较[J]. 地理科学进展, 2016, 35(10): 1197-1205. [Zheng Xuemei, Wang Yi, Wu Xiaoying, et al. Comparison of heat wave vulnerability between coastal and inland cities of Fujian Province in the past 20 years[J]. Progress in Geography, 2016, 35 (10): 1197-1205.]

[23] 陈恺, 唐燕. 城市高温热浪脆弱性空间识别与规划策略应对——以北京中心城区为例[J]. 城市规划, 2019, 43(12): 37-44. [Chen Kai, Tang Yan. Identification of urban areas vulnerability to heat waves and coping strategies: A case study of Beijing central city[J]. City Planning Review, 2019, 43(12): 37-44.]

[24] 黄晓军, 祁明月, 赵凯旭, 等. 高温影响下西安市人口脆弱性评估及其空间分异[J]. 地理研究, 2021, 40(6): 1684-1700. [Huang Xiaojun, Qi Mingyue, Zhao Kaixu, et al. Assessment of population vulnerability to heat stress and spatial differentiation in Xi' an[J]. Geographical Research, 2021, 40(6): 1684-1700.]

[25] Walter L F, Leyre E I, Alice N, et al. Coping with the impacts of urban heat islands: A literature based study on understanding urban heat vulnerability and the need for resilience in cities in a global climate change context[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 171: 1140-1149.

[26] 杨林川, 杨皓森, 范强雪, 等. 大城市高温热浪脆弱性评价及规划应对研究——以成都市为例[J]. 规划师, 2023, 39(2): 38-45. [Yang Linchuan, Yang Haosen, Fan Qiangxue, et al. Vulnerability assessment and planning response to high-temperature wave in large cities: The case of Chengdu[J]. Planners, 2023, 39(2): 38-45.]

[27] Azevedo J A, Chapman L, Muller C L. Quantifying the daytime and night-time urban heat island in Birmingham, UK: A comparison of satellite derived land surface temperature and high resolution air temperature observations[J]. Remote Sensing, 2016, 8(2): 153-170.

[28] Cao J, Zhou W Q, Zheng Z, et al. Within-city spatial and temporal heterogeneity of air temperature and its relationship with land surface temperature[J]. Landscape and Urban Planning, 2021, 206: 103979, doi: 10.1016/j.landurbplan.2020.103979.

[29] Kovats R S, Hajat S. Heat stress and public health: A critical review[J]. Annual Review of Public Health, 2008, 29: 41-55.

[30] 郭禹慧, 黄晓军, 郑殿元, 等. 极端高温胁迫下中国城市脆弱性格局与影响因素[J]. 热带地理, 2021, 41(3): 596-608. [Guo Yuhui, Huang Xiaojun, Zheng Dianyuan, et al. Urban vulnerability pattern and influencing factors under extreme heat stress in China[J]. Tropical Geography, 2021, 41(3): 596-608.]

[31] 赵志欣, 霍艾迪, 张丹, 等. 基于遥感的宁夏地区高温热浪风险评估[J]. 干旱区地理, 2022, 45(2): 512-521. [Zhao Zhixin, Huo Aidi, Zhang Dan, et al. Assessing heat wave risk in Ningxia segment based on remote sensing[J]. Arid Land Geography, 2022, 45 (2): 512-521.]

[32] 博文静, 沈钰仟, 王馨悦, 等. 植被覆盖度对夏季降温效应的影响——以内蒙古为例[J]. 生态学报, 2022, 42(22): 9165-9174. [Bo Wenjing, Shen Yuqian, Wang Xinyue, et al. The influence of vegetation coverage on cooling effect in summer: A case study of the Inner Mongolia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(22): 9165-9174.]

[33] Wan Z M. New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity product[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 140: 36-45.

[34] 张秀, 王旭红, 郑玉蓉, 等. 气溶胶光学厚度和不透水地表覆盖度对城市热岛强度的影响——以关中地区为例[J]. 生态学报, 2021, 41(22): 8965-8976. [Zhang Xiu, Wang Xuhong, Zheng

Yurong, et al. Effects of aerosol optical depth and impervious surface percentage on urban heat island intensity: A case study in Guanzhong Region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(22): 8965-8976.]

[35] 李菲菲, 周霞, 周玉玺. 西北地区农业干旱脆弱性评估及时空分布特征[J]. 干旱区研究, 2023, 40(4): 663-669. [Li Feifei, Zhou Xia, Zhou Yuxi. Vulnerability assessment and spatiotemporal distribution of agricultural drought in northwest China[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(4): 663-669.]

[36] 黄晓军, 王博, 刘萌萌, 等. 中国城市高温特征及社会脆弱性评价[J]. 地理研究, 2020, 39(7): 1534-1547. [Huang Xiaojun, Wang Bo, Liu Mengmeng, et al. Characteristics of urban extreme heat and assessment of social vulnerability in China[J]. Geographical Research, 2020, 39(7): 1534-1547.]

[37] 梁秀娟, 王旭红, 牛林芝, 等. 大西安都市圈城市热岛效应时空分布特征及AOD对热岛强度的影响研究[J]. 生态环境学报, 2020, 29(8): 1566-1580. [Liang Xiujuan, Wang Xuhong, Niu Linzhi, et al. Research on the temporal and spatial distribution characteristics of urban heat island effect and the influence of AOD on urban heat island intensity in the greater Xi'an metropolitan area[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(8): 1566-1580.]

[38] 王丹舟, 张强, 朱秀迪, 等. 基于多源数据的上海市高温热浪风险评估[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(5): 613-623. [Wang Danzhou, Zhang Qiang, Zhu Xiudi, et al. Multisource data evaluation of heat risk in Shanghai[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edtion), 2021, 57(5): 613-623.]

Evaluation of heat vulnerability and its spatial-temporal variation in the Guanzhong area

BAO Wei[1], HUANG Xiaojun[1,2,3], JI Wangdi[1]

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, Shaanxi, China; 3. Shaanxi Xi'an Urban Forest Ecosystem Research Station, Xi'an 710127, Shaanxi, China)

Abstract: With global warming, extreme heat events have occurred more frequently, posing significant threats to human health, and social and economic development in many regions. This study comprehensively utilizes remote sensing data and socio-economic statistics to develop a heat vulnerability evaluation index system based on the "exposure-sensitivity-adaptability" framework. This approach quantifies heat vulnerability and reveals its spatiotemporal characteristics in the Guanzhong region of Shaanxi Province, China, from 2005 to 2020. The results indicate that: (1) The high-temperature zones of summer land surface temperature in the Guanzhong region expanded from 2005 to 2020. The spatial pattern of land surface temperature remained relatively consistent, with sub-high-temperature and high-temperature zones distributed sporadically in the central area, while sub-low-temperature and low-temperature zones were concentrated in the southern Qinling Mountains. (2) Heat vulnerability in the Guanzhong region exhibited significant spatial clustering, mirroring the distribution pattern of surface temperature. Higher vulnerability zones were predominantly located in the central plains, whereas lower and low vulnerability zones were mainly found in the southern Qinling Mountains. (3) The heat vulnerability index of the Guanzhong region showed a decreasing trend from 2005 to 2020, with the proportion of higher and high vulnerability areas declining from 48.20% in 2005 to 37.49% in 2020. (4) From 2005 to 2010, changes in heat vulnerability levels were relatively minor, whereas from 2010 to 2020, the extent of changes increased substantially, with most regions experiencing a decrease in vulnerability levels. This change was primarily characterized by medium vulnerability shifting to lower vulnerability, higher vulnerability reducing to medium vulnerability, and high vulnerability decreasing to higher vulnerability. The findings offer valuable insights for enhancing heat adaptability and mitigating heat vulnerability.

Key words: land surface temperature; heat vulnerability; spatial-temporal variation; Guanzhong area